МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

И. И. ДЗЮБИН

ЗАПИРАЕМЫЕ ТИРИСТОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ



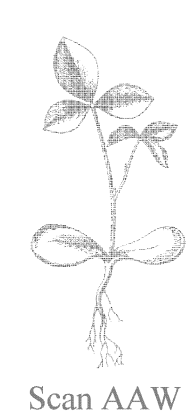
МАССОВАЯ
РАДИО
БИБЛИОТЕКА

Выпуск 916

И. И. ДЗЮБИН

ЗАПИРАЕМЫЕ ТИРИСТОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ





«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1976

6Ф0.32
Д43
УДК 621.382.2.026.072

И. И. Дзюбин

Д43 Запираемые тиристоры и их применение. М., «Энергия», 1976.

40 с. с ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 916).

В брошюре рассмотрен принцип действия и характеристики запираемых тиристоров, даны примеры их применения в различных устройствах (переключателях, импульсных генераторах, триггерах, счетчиках и др.). Описаны схемы управления запираемыми тиристорами, приведены их электрические параметры.

Брошюра рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

Д $\frac{30404\text{-}431}{051(01)\text{-}76}$ 171-76 6Ф0.32

ПРЕДИСЛОВИЕ

Запираемые тиристоры относятся к классу четырехслойных полупроводниковых приборов. Основная отличительная особенность запираемых тиристоров состоит в их способности открываться и закрываться с помощью сигналов, подаваемых в цепь управления. Так, положительный импульс тока открывает запираемый тиристор, а последующий отрицательный импульс закрывает его. Такой механизм коммутации имеет явное преимущество по сравнению с механизмом коммутации транзистора, поскольку запираемые тиристоры сохраняют проводящее состояние при отсутствии входного сигнала, а следовательно, требуют значительно меньшую мощность для управления. Кроме того, запираемые тиристоры могут быть выполнены на более высокие рабочие напряжения и большие импульсные токи в открытом состоянии. Перечисленные свойства запираемых тиристоров позволяют им успешно конкурировать с мощными транзисторами, работающими в режиме переключения.

Их можно эффективно использовать как в маломощных импульсных устройствах (генераторах, усилителях, триггерах, счетчиках и т. п.), так и в выходных устройствах автоматики, где уровень мощностей значительно выше.

Цель настоящей книги — дать в систематизированной форме необходимые сведения о принципе действия и характеристиках запираемых тиристоров. Основной материал книги посвящен рассмотрению схем бесконтактных переключателей, генераторов, импульсных усилителей, а также ряда других устройств, выполненных на базе запираемых тиристоров.

Книга поможет радиолюбителям оценить достоинства и недостатки запираемых тиристоров и будет служить исходным материалом для разработки собственных схем различных переключающих устройств.

Автор

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАПИРАЕМЫХ ТИРИСТОРАХ

Устройство и принцип действия запираемых тиристоров. Проводящие и запирающие свойства четырехслойных полупроводниковых приборов определяются наличием в толще полупроводниковой пластины чередующихся слоев с различными типами проводимости.

На рис. 1,*а* схематически представлена структура тиристора. Четыре слоя области образуют три *p-n* перехода $П_1$, $П_2$, $П_3$. Две крайние области (*p* и *n*) являются соответственно анодом *А* и ка-

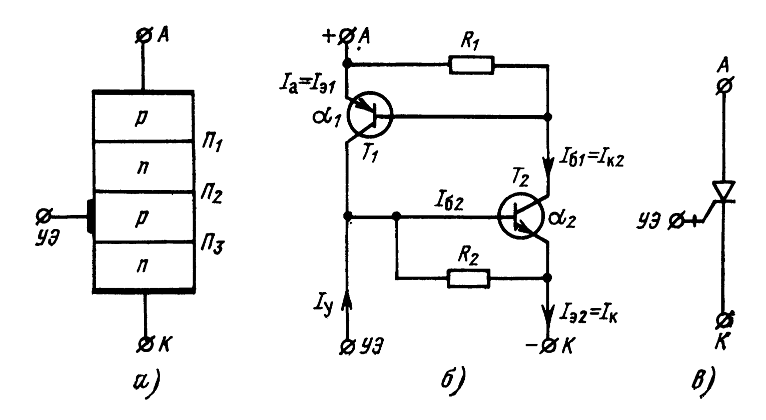


Рис. 1. Запираемый тиристор.

а — четырехслойная структура тиристора; *б* — двухтранзисторная схема замещения; *в* — условное обозначение.

тодом *К*, а средние слои являются базами *n*- и *p*-типов. К одному из средних слоев присоединяется управляющий электрод *УЭ*.

Четырехслойные полупроводниковые приборы, имеющие два вывода (анод и катод), называются диодными тиристорами *ДТ*, а имеющие три вывода (анод, катод и управляющий электрод) — триодными тиристорами *ТТ*. Триодный тиристор, способный не только открываться, но и закрываться по управляющему электроду, получил название запираемого тиристора *ЗТ*.

Для анализа принципа действия запираемого тиристора целесообразно его четырехслойную структуру представить в виде схемы замещения (рис. 1,*б*), состоящей из двух транзисторов T_1 и T_2 соответственно *p-n-p-* и *n-p-n*-типов. В этой схеме для учета нелинейной зависимости коэффициентов усиления α_1 и α_2 от тока эмиттерные переходы транзисторов шунтируются сопротивлениями R_1

и R_2. База и коллектор транзистора T_1 соединены соответственно с коллектором и базой транзистора T_2, образуя цепь внутренней положительной обратной связи.

Если к аноду тиристора подключить положительный полюс внешнего источника питания, а к катоду — отрицательный, то переходы $П_1$ и $П_3$ будут смещаться в прямом, а центральный переход $П_2$ — в обратном направлениях. Таким образом, напряжение источника питания окажется приложенным к переходу $П_2$ и ток во внешней цепи будет определяться выражением [Л. 9]

$$I = \frac{I_{к0}}{1-(\alpha_1+\alpha_2)},$$

где $I_{к0}$ — обратный ток перехода $П_2$.

Из этого выражения видно, что ток I зависит от коэффициентов α_1 и α_2 и резко возрастает, когда их сумма приближается к единице.

Наличие входного сигнала позволяет увеличивать коэффициенты усиления составных транзисторов независимо от приложенного напряжения и протекающего через прибор тока. Действительно, ток управления $I_у$, поступая на базу транзистора T_2, увеличивает ток через него, а следовательно, и коэффициент усиления α_2. Возрастание тока через транзистор T_2 вызывает увеличение эмиттерного и коллекторного токов транзистора T_1. Этот процесс приводит к тому, что коллекторные токи обоих транзисторов лавинно нарастают, коэффициенты усиления α_1 и α_2 резко увеличиваются и оба транзистора переходят в режим насыщения. Сумма коэффициентов усиления $\alpha_1+\alpha_2$ при этом становится равной единице, сопротивление между анодом и катодом тиристора снижается до нескольких долей ома, а ток, протекающий через переход $П_2$, при этом определяется выражением

$$I = \frac{I_{к0}+\alpha_2 I_у}{1-(\alpha_1+\alpha_2)}.$$

Таким образом, управляя током, протекающим через один из эмиттерных переходов, можно переключать тиристор в проводящее состояние почти независимо от значения приложенного к прибору напряжения.

При этом отключение управляющего сигнала не вносит изменений в процесс протекания анодного тока через тиристор, так как базы транзисторов T_1 и T_2 заполнены неравновесными носителями, которые обеспечивают взаимную встречную инжекцию от эмиттеров. В этом заключается принципиальное различие транзистора и тиристора. Транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером и работающий в режиме насыщения, при снятии управляющего сигнала выключается. Это происходит потому, что прекращается приток основных носителей в базу. В тиристоре же ток базы транзистора T_1 является током коллектора T_2 и наоборот, т. е. независимо от наличия управляющего сигнала при открытом тиристоре всегда имеется источник основных носителей в базах. Это и поддерживает в тиристоре состояние насыщения.

Открытый тиристор (диодный или триодный) можно запереть, если разорвать анодную цепь или уменьшить проходящий через него ток до значения, меньшего $I_{выкл}$. Однако это требует усложнения схемы. В запираемых тиристорах выключение прибора осу-

ществляется с помощью отрицательного сигнала, подаваемого в цепь управляющего электрода. В этом случае ток базы транзистора T_1 становится равным [Л. 9, 11]

$$I_{б1} = \alpha_1 I_{э1} - I_з,$$

где $I_{э1}$ — эмиттерный ток транзистора T_1; $I_з$ — ток запирания тиристора.

Транзистор T_1 можно вывести из состояния насыщения при условии

$$\alpha_1 I_{э1} - I_з < (1 - \alpha_2) I_{э2},$$

где $I_{э2}$ — ток эмиттера транзистора T_2.

Учитывая, что $I_{э1} = I_{э2} + I_з = I_а$, получим:

$$I_а = (\alpha_1 + \alpha_2 - 1) < \alpha_2 I_з,$$

где $I_а$ — ток анода тиристора, при котором происходит запирание.

Способность тиристора к запиранию по управляющему электроду характеризуется коэффициентом запирания $K_з$ [Л. 9, 11]:

$$K_з = \frac{I_а}{I_з} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 - 1}.$$

Из этого выражения следует, что коэффициент запирания зависит от коэффициентов усиления α_1 и α_2 транзисторов и тем больше, чем больше α_2 и чем ближе к единице сумма $\alpha_1 + \alpha_2$. Физически это означает, что чем меньше степень насыщения центрального перехода, тем легче запирается тиристор. С другой стороны, для

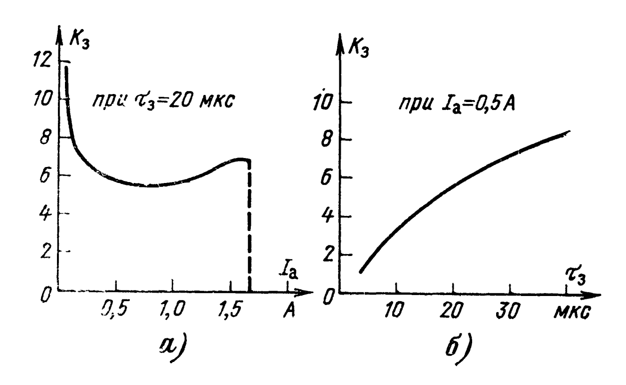


Рис. 2. Характеристики запираемых тиристоров.

получения высокого коэффициента усиления при отпирании необходимо, чтобы коэффициент α_1 был близок к единице. Одновременное выполнение этих условий — достаточно сложная техническая проблема, поэтому для запираемых тиристоров характерен низкий коэффициент усиления при запирании.

На рис. 2,*а* приведена зависимость коэффициента запирания от анодного тока для тиристора КУ204. По мере увеличения тока

коэффициент $K_з$ быстро падает от бесконечности при $I_а = I_{выкл}$ до некоторого минимального значения, после чего опять начинает постепенно увеличиваться. При достаточно большом значении анодного тока тиристор может не выключиться по управляющему электроду. Это объясняется тем, что при увеличении анодного тока возрастает ток запирания тиристора. В результате крайние области перехода $П_3$ пробиваются и тиристор выходит из строя. Поэтому коммутировать по управляющему электроду анодный ток тиристора, превышающий его номинальное значение, не рекомендуется.

Зависимость коэффициента $K_з$ от длительности запирающего импульса $\tau_з$ приведена на рис. 2,*б*. С уменьшением длительности запирающего импульса коэффициент запирания резко падает. Для получения максимального быстродействия ключевых схем на запираемых тиристорах необходимо работать при токах, близких к максимально допустимому току запирания тиристора.

Запираемые тиристоры изготовляются из кремния, хотя их можно изготовить и на основе германия. Выбор кремния в качестве исходного материала обусловлен, во-первых, ярко выраженной зависимостью коэффициентов усиления α от протекающего тока, во-вторых, более широким диапазоном рабочих температур (до 150°С) и, в-третьих, более высоким удельным сопротивлением, что позволяет создавать приборы с высоким напряжением переключения.

Кристалл со структурой запираемого тиристора монтируется в герметичном металлическом корпусе. Герметизация осуществляется с помощью синтетических заливочных компаундов. Это предохраняет прибор от влияния климатических условий, а также обеспечивает стабильность его параметров в течение срока службы.

Монтаж и эксплуатация запираемых тиристоров должны производиться с учетом выполнения следующих основных требований:

температура окружающей среды должна быть —60÷+110°С;

пайку изолированных выводов можно производить на расстоянии не менее 3—5 мм от корпуса прибора;

температура корпуса прибора не должна превышать значений, указанных в технических условиях;

основные параметры тиристоров не должны превышать максимально допустимых значений.

В соответствии с ГОСТ 10862-72 тиристорам присваиваются обозначения, состоящие из пяти элементов. Первый элемент обозначения — буква К (или цифра 2) указывает, что исходным полупроводниковым материалом является кремний. Второй элемент обозначения указывает класс приборов: Н — диодные тиристоры, У — триодные тиристоры. Третий элемент обозначения определяет назначение прибора: цифра 3 для запираемых тиристоров малой мощности, цифра 4 для тиристоров средней мощности. Четвертый и пятый элементы определяют порядковый номер разработки технологического типа прибора и обозначаются цифрами от 01 до 99.

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАПИРАЕМЫХ ТИРИСТОРОВ

Режим работы запираемых тиристоров хорошо иллюстрируется их вольт-амперными характеристиками: статической и входной. Первая определяет закон изменения анодного тока от анодного напряжения при фиксированных значениях тока управления: $I_а = f(U_а)$ при $I_у = \text{const}$. Входная характеристика определяет зависимость между током и напряжением, необходимым для переключения (от-

пирания и запирания) тиристора: $\dot{I}_у=f(\dot{U}_у)$, $I_з=\dot{f}(\dot{U}_з)$ при $\dot{I}_а=$ $=\text{const}$.

Статические вольт-амперные характеристики. На рис. 3 показано семейство статических вольт-амперных характеристик запираемого тиристора. Здесь по горизонтальной оси отложено напряжение между анодом и катодом, а по вертикальной — ток через тиристор.

На приведенных зависимостях имеется ряд характерных участков. Участок *I* характеризует закрытое состояние тиристора: здесь увеличение анодного напряжения мало влияет на значение тока, проходящего через прибор. Прямое анодное напряжение, соответствующее точке *A* характеристики, называется напряжением включения $U_{вкл}$, а прямой ток, протекающий при этом через закрытый прибор, — током включения $I_{вкл}$. Участок *II* соответствует процессу переключения прибора, а участок *III* является рабочим и характеризует полностью открытое состояние тиристора.

Рассмотрим процесс отпирания тиристора при токе управления $I_у>0$. Если к управляющему электроду приложен положительный потенциал, а к катоду — отрицательный, то при токе управления, равном току спрямления $I_{спр}$, тиристор полностью откроется. В этом

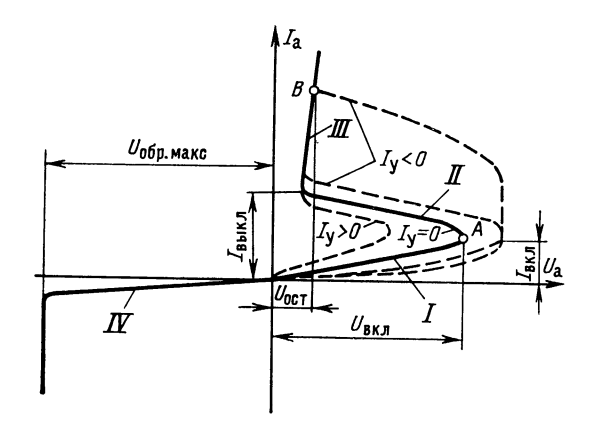


Рис. 3. Семейство статических вольт-амперных характеристик тиристора.

случае через него протекает прямой анодный ток, а падение напряжения на открытом тиристоре станет равным остаточному напряжению $U_{ост}$. Будучи включенным, тиристор остается в открытом состоянии до тех пор, пока ток, протекающий через него, превышает некоторый минимальный ток, называемый током включения $I_{вкл}$.

При токе управления $I_у<0$ ток выключения $I_{выкл}$ растет. Увеличивая таким образом $I_{выкл}$, можно переключить тиристор в закрытое состояние. Переход запираемого тиристора в закрытое состояние начинается в точке *B* при анодном токе $I_а=I_{выкл}$ и при токе управления $I_у<0$. В этой точке падение напряжения на переходе $П_2$ (см. рис. 1) очень мало, следовательно, ток центрального *p-n* перехода также мал и его можно не учитывать. Поэтому полный ток, протекающий через переход $П_2$, равен анодному току.

Значение обратного напряжения $U_{обр}$ (участок IV), которое можно прикладывать к запираемому тиристору, определяется удельным сопротивлением переходов $П_1$ и $П_3$ и концентрацией примесей в переходах. Поскольку запираемые тиристоры предназначены в основном для коммутации на постоянном токе, значение $U_{обр}$ не превышает десятков вольт. Так, для тиристоров типа 2У102 наибольщее обратное напряжение $U_{обр.макс}$ не превышает 5 В. В случае, если появляется необходимость в увеличении обратного напряжения, то последовательно с запираемым тиристором можно включать обычный полупроводниковый диод.

К основным статическим параметрам запираемого тиристора относятся также: импульсный ток запирания $I_з$ — ток, при котором тиристор переключается в закрытое состояние при заданных значениях анодного тока и напряжения; импульсное напряжение запирания $U_з$ — обратное напряжение на управляющем электроде по отношению к катоду в начальный момент запирания тиристора.

Входная вольт-амперная характеристика. Для анализа процесса запирания тиристора рассмотрим его входную характеристику, представленную на рис. 4.

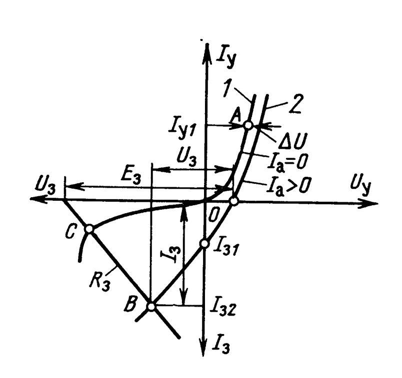


Рис. 4. Входные вольт-амперные характеристики запираемого тиристора.

Рис. 5. Выключение запираемого тиристора.

Если источник питания управляющей цепи отключен (кривая *1*), тиристор закрыт и ток $I_а=0$. При подключении ко входу прибора источника питания $E_у$ тиристор открывается и рабочая точка перемещается с кривой *1* на кривую *2*. Падение напряжения ΔU обусловлено протеканием тока через нагрузку.

Для запирания тиристора необходимо отключить источник $E_у$ и подключить источник питания $E_з$. При увеличении тока запирания от значения $I_{з1}$ до $I_{з2}$ происходит рассасывание зарядов в базе тиристора. Ток $I_{з2}$ вызывает уменьшение эмиттерного тока транзистора T_2 (см. рис. 1), а следовательно, и уменьшение коэффициентов усиления α_1 и α_2 транзисторов, достаточное для запирания тиристора. При этом рабочая точка из положения B перемещается в положение C по линии, угол наклона которой пропорционален сопро-

тивлению генератора запирающих импульсов $R_з$. Последний должен обеспечить протекание тока запирания $I_з$ до того момента, пока анодный ток $I_а$ не станет меньше $I_з$ и переход $П_3$ тиристора не начнет запираться. Чем выше внутреннее сопротивление генератора, тем больший ток требуется для запирания тиристора. На практике выбирают генераторы с малым внутренним сопротивлением, особенно в тех случаях, когда длительность импульса управления значительно превышает время выключения $t_{выкл}$ тиристора.

Определим минимальную длительность импульса, необходимую для запирания тиристора. Для этого весь процесс запирания разобьем на три этапа (рис. 5). До начала процесса запирания центральный переход тиристора находится в состоянии насыщения и через тиристор протекает ток $I_а$. При подаче в цепь управляющего электрода запирающего импульса $I_з$ длительностью $\tau_з$ происходит изменение анодного тока во времени.

На первом этапе $t_{расс}$ происходит рассасывание избыточных зарядов под воздействием запирающего сигнала. Анодный ток на этом этапе меняется незначительно.

На втором этапе $t_{рег}$ вследствие возникновения положительной обратной связи ток через тиристор лавинообразно уменьшается и носит регенеративный характер. Для надежного запирания тиристора длительность запирающего импульса $\tau_з$ должна быть не менее $t_{расс}+t_{рег}$. В противном случае происходит срыв процесса запирания, так как в базах находится еще достаточное количество зарядов, способных перевести тиристор в проводящее состояние.

На третьем этапе $t_{восст}$ анодный ток медленно падает и тиристор восстанавливает запирающие свойства. Если длительность импульса $\tau_з<t_{расс}+t_{рег}+t_{восст}$, возможно ложное срабатывание тиристора под воздействием дырочного тока, поступающего в p-базу через коллекторный переход. Этот ток может вызвать перезаряд емкости перехода $П_3$ до положительного напряжения, в результате чего переход $П_3$ может открыться.

Таким образом, длительность запирающего импульса должна быть не менее суммы $t_{расс}+t_{рег}+t_{восст}$. Каждое из слагаемых этой суммы уменьшается с возрастанием тока запирания. Это означает, что увеличение амплитуды запирающих импульсов позволяет сократить их длительность.

На характеристики запирания оказывает влияние и значение прямого напряжения на тиристоре. Длительность импульса $\tau_з$ растет с увеличением напряжения $U_{пр}$ за счет изменения коэффициентов усиления α. Как и любой полупроводниковый прибор, запираемый тиристор чувствителен к колебаниям температуры окружающей среды. С повышением температуры коэффициент запирания $K_з$ увеличивается.

Рассмотренные свойства запираемых тиристоров определяют область их применения. В настоящее время они используются в устройствах, питающихся от источника постоянного тока. Запираемые тиристоры обеспечивают более простую схему отключения нагрузки и способны работать при более высоких частотах, чем обычные триодные тиристоры. Кроме этого, в целом ряде случаев запираемые тиристоры позволяют упростить построение таких импульсных устройств, как триггеры, усилители, счетчики и др.

Что касается использования запираемых тиристоров в цепях переменного тока, то здесь предпочтение надо отдать симметричным и триодным тиристорам.

УПРАВЛЕНИЕ ЗАПИРАЕМЫМИ ТИРИСТОРАМИ

Основное назначение устройств и схем управления запираемыми тиристорами — создание биполярных сигналов, необходимых для надежного отпирания и запирания тиристора.

Запираемый тиристор открывается подобно триодному и его входная вольт-амперная характеристика при включении аналогична характеристике триодного тиристора. Включение может осуществляться от источника анодного напряжения или с помощью специальных генераторов, при этом управляющий сигнал может представлять собой постоянный ток или иметь форму импульса с достаточно крутым фронтом. Полярность управляющего запускающего сигнала должна быть положительной по отношению к катоду тиристора. В общем случае условиями надежного отпирания тиристоров являются:

$$I_у \geqslant I_{спр};\ U_у \geqslant U_{спр};\ I_у U_у \leqslant P_{у.макс},$$

где $I_{спр}$ — импульсный ток спрямления; $U_{спр}$ — импульсное напряжение спрямления; $P_{у.макс}$ — максимально допустимая входная мощность управляющего сигнала.

Более эффективно использовать для управления тиристорами экономичные импульсные источники тока. В этом случае тиристоры включают кратковременными сигналами определенной длительности, причем амплитуда управляющего сигнала может значительно превышать постоянный входной ток, а запас по максимально допустимому режиму цепи управления обеспечивается при выполнении условия

$$P_у \tau_у f_у < P_{у.макс},$$

где $\tau_у$ и $f_у$ — длительность импульса и частота следования управляющего сигнала соответственно.

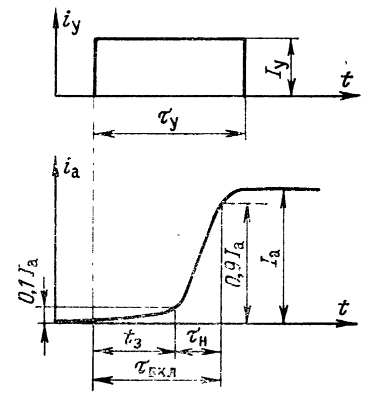


Рис. 6. Включение запираемого тиристора.

На рис. 6 приведен график, иллюстрирующий процесс отпирания тиристора. При подаче на управляющий электрод импульса переключение тиристора из закрытого состояния в проводящее произойдет не мгновенно, а с некоторым запаздыванием, называемым временем задержки $t_з$. Это объясняется тем, что повышение концентрации основных носителей, а следовательно, и соответствующий рост инжекции электронов происходит неравномерно и начинается лишь в очень узкой зоне, примыкающей к управляющему электроду. Продолжительность управляющего импульса определяется временем, необходимым для нарастания тока в анодной цепи тиристора. Интервал времени, в течение которого анодный ток увеличивается от 0,1 до 0,9 своего первоначального значения, называется временем нарастания анодного тока $\tau_н$. Таким образом, полное время включения тиристора равно $\tau_{вкл} = t_з + \tau_н$.

Поскольку рост анодного тока определяется параметрами схемы, а также режимом нагрузки, длительность управляющего импульса выбирается несколько большей времени включения $\tau_у > \tau_{вкл}$. При увеличении тока управления $I_у$ время задержки $t_з$ несколько сокращается и для тиристоров 2У102, КУ204 может быть выбрано в пределах от 3 до 5 мкс.

Управление запираемыми тиристорами имеет ряд особенностей, поэтому при разработке схем управления необходимо учитывать следующие факторы: включение и выключение запираемого тиристора осуществляется импульсами различной полярности; наличие биполярного сигнала приводит к необходимости развязки генераторов запускающих и запирающих импульсов.

Управление запираемыми тиристорами может осуществляться как от одного источника питания, когда биполярный сигнал формируется с помощью реактивных элементов или включением нагрузки в катодную цепь тиристора, так и от двух источников питания, один из которых является дополнительным источником смещения.

Схемы управления с одним источником питания. На рис. 7,*а* показана схема управления запираемым тиристором *ЗТ* с помощью конденсатора, включенного последовательно в цепь управляющего электрода. При разомкнутом выключателе *В* конденсатор *С* через резистор R_1 и внутреннее сопротивление управляющей цепи заряжается до напряжения источника питания *Е* и на входе тиристора

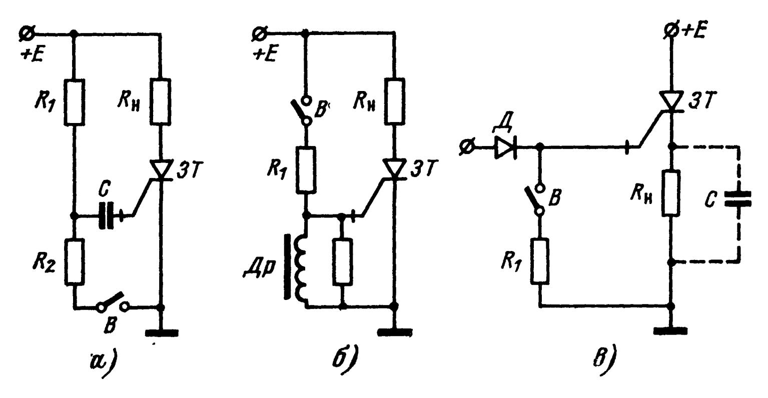


Рис. 7. Схемы управления запираемым тиристором с одним источником питания.

появляется запускающий импульс положительной полярности. Тиристор открывается, и все напряжение прикладывается к нагрузке. При замыкании выключателя *В* происходит разряд конденсатора через резистор R_2 и внутреннее сопротивление управляющей цепи *ЗТ*, обеспечивая на входе тиристора импульс отрицательной полярности. Для запирания тиристора достаточно иметь [Л. 9, 16]:

$$R_2 \leqslant \frac{E - U_{з.макс}}{2I_{з.макс}}; \quad C \geqslant \frac{\tau_з}{R_2 + \dfrac{U_{з.макс}}{I_{з.макс}}},$$

где $U_{з.макс}$ — максимальное напряжение, необходимое для запирания тиристора; $I_{з.макс}$ — максимальный ток запирания; $\tau_з$ — длительность запирающего импульса.

В большинстве практических схем сопротивление резистора R_2 выбирают меньше расчетного. Нижний предел R_2 определяется либо по допустимому току через выключатель *В*, либо по допустимой мощности рассеивания тиристора *3Т*.

В схеме рис. 7,*б* запирание тиристора *3Т* осуществляется посредством прерывания постоянного тока, протекающего через дроссель, включенный между управляющим электродом и катодом тиристора. При замыкании выключателя *В* тиристор переключается в проводящее состояние, если соблюдается условие:

$$\frac{E}{R_1} \geqslant I_{у.макс},$$

где $I_{у.макс}$ — максимальный ток управления.

При размыкании выключателя *В* возникает импульс тока отрицательной полярности, обусловленный э. д. с. самоиндукции дросселя *Др*. Этот импульс запирает тиристор *3Т*. Условием надежного запирания тиристора является соблюдение следующих неравенств [Л. 16]:

$$\frac{E}{R_1} \geqslant 2I_з; \ \frac{LI_з}{U_з} \geqslant \tau_з,$$

где L — индуктивность дросселя.

На рис. 7,*в* приведена схема, обеспечивающая запирание тиристора *3Т* без использования накопителей энергии. Как правило, в этих случаях сопротивление нагрузки $R_н$ включается в катодную цепь тиристора. Тиристор *3Т* открывается при подаче запускающего импульса через диод *Д* (выключатель *В* разомкнут). При замыкании выключателя управляющий электрод тиристора через резистор R_1 подключается к минусу источника питания E, в результате чего в цепи управляющего электрода возникает ток $I_з$, вызывающий запирание тиристора. Сопротивление резистора R_1 выбирается из условия обеспечения необходимого тока запирания тиристора [Л. 16]

$$R_1 \leqslant R_н(K_з - 1) - \frac{U_{з.макс}}{I_а K_з},$$

где $I_а$ — максимальный анодный ток в период переключения, определяемый по формуле

$$I_а = \frac{I_н}{\left(1 - \frac{1}{K_з}\right)},$$

где $I_н$ — ток через нагрузку.

Для поддержания напряжения на сопротивлении $R_н$ при снижении тока нагрузки резистор $R_н$ шунтируют конденсатором *С*, который также способствует ускорению процесса запирания тиристора. Диод *Д* служит для развязки входной цепи тиристора *3Т* от генератора запускающих импульсов.

Ввиду того что в рассмотренной схеме отсутствуют реактивные элементы, ей свойственно более высокое быстродействие. Однако при запирании тиристора возрастает его анодный ток за счет

тока управления, протекающего через резистор R_1. В результате приходится снижать ток через нагрузку $R_н$ с тем, чтобы не превысить максимально допустимого значения анодного тока, указанного в технических условиях. Это является существенным недостатком схем с нагрузкой в цепи катода. От этого недостатка свободны схемы управления с двумя источниками питания.

Схемы управления с двумя источниками питания. В схеме, показанной на рис. 8,*а*, нагрузка включена в анодную цепь тиристора *3Т*. При подаче входного отрицательного сигнала $U_{вх}$ на базу транзистора *Т* последний закрывается и от дополнительного низко-

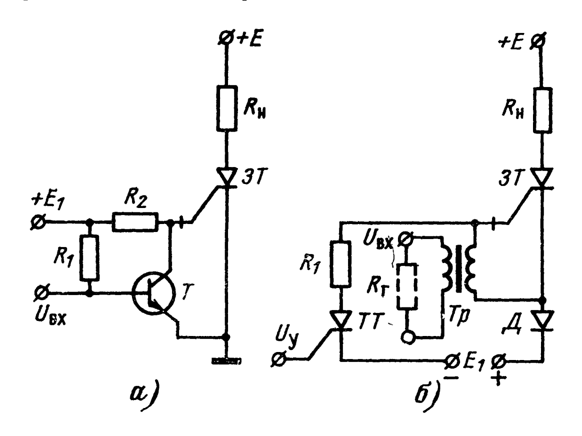


Рис. 8. Схемы управления с двумя источниками питания.
а — с транзисторным ключом; *б* — с тиристорным ключом.

вольтного источника питания E_1 через резистор R_2 поступает управляющий сигнал, открывающий тиристор *3Т*. При отсутствии сигнала $U_{вх}$ транзистор находится в состоянии насыщения. Управляющий электрод тиристора *3Т* при этом накоротко замкнут, что обеспечивает его запирание.

Простота управления и отсутствие реактивных элементов, а также низкий уровень входного сигнала позволяют использовать такие схемы в качестве выходных в системах автоматики и логических схемах. При этом их выполняют в виде одного прибора в общем корпусе.

Может быть применена трансформаторная связь тиристора *3Т* с генератором запускающих импульсов (рис. 8,*б*). Это позволяет при относительно больших значениях напряжения источника питания *Е* и тока нагрузки $I_н$ управлять тиристором с помощью сравнительно коротких импульсов. При подаче входного сигнала $U_{вх}$ тиристор *3Т* открывается и через нагрузку $R_н$ протекает ток. Для запирания тиристора *3Т* на триодный тиристор *ТТ* подается импульс $U_у$, амплитуда и длительность которого определяются техническими требованиями на триодный тиристор. Диод *Д* необходим для отключения тиристора *ТТ* после запирания тиристора *3Т*. Выбор типа диода определяется допустимыми значениями его обратного тока и напряжения: $I_{обр}<I_{выкл.тт}$, $U_{обр}=E_1$.

Средний ток, потребляемый от источника смещения E_1, весьма мал, так как после запирания тиристора *ЗТ* диод *Д* разрывает цепь источника E_1.

Быстродействие схемы определяется только частотными возможностями тиристоров, поэтому оно значительно выше, чем в схемах с реактивными коммутационными элементами.

БЕСКОНТАКТНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Бесконтактная коммутация сигналов постоянного и переменного тока возможна с помощью различных схем, использующих выпрямительные диоды, транзисторы и тиристоры. Качество любого из перечисленных ключевых устройств определяется в первую очередь минимальным током в разомкнутом состоянии и скоростью переключения. Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют ключевые устройства, собранные на запираемых тиристорах, так как их характеристики близки к характеристикам идеального ключа и

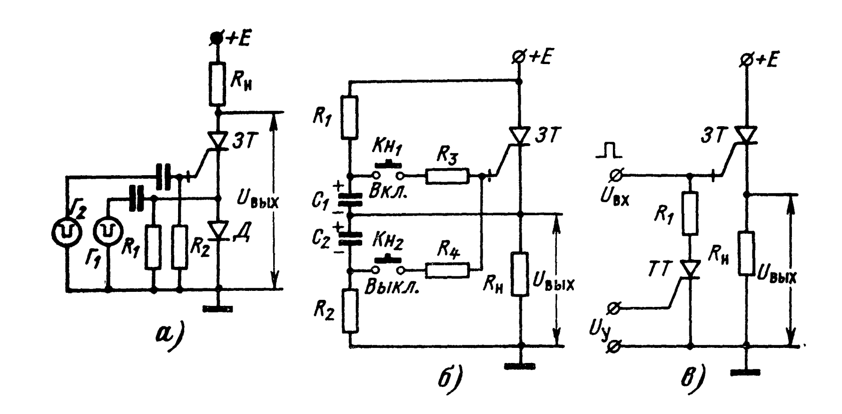


Рис. 9. Схемы переключателей постоянного тока.

они могут выполнять функции обычных выключателей. Преимущества запираемых тиристоров особенно ощутимы в тех случаях, когда требуются высокое рабочее напряжение, быстродействие, долговечность и т. п. Схемы некоторых таких устройств рассмотрены ниже.

Переключатели постоянного тока. Простейшая схема переключателя постоянного тока приведена на рис. 9,*а*. Отпирание и запирание тиристора *ЗТ* осуществляются от двух генераторов однополярных импульсов $Г_1$ и $Г_2$.

Для отпирания тиристора используется отрицательный импульс, подаваемый от генератора $Г_1$, что соответствует положительному току управления. Запирание тиристора происходит при подаче отрицательного импульса от генератора $Г_2$.

Если пренебречь обратным током диода *Д*, то необходимые для отпирания и запирания токи $I_у$ и $I_з$ могут быть определены из

следующих условий [Л. 1]:

$$I_у \geqslant I_{вкл} \geqslant \frac{E_1}{R_{i1}+R_{зт}+R_2}\ ;\ I_з \geqslant I_{выкл} \geqslant \frac{E_2}{R_{i2}+R_{зт}+R_1},$$

где E_1 и E_2 — э. д. с. генераторов $Г_1$ и $Г_2$ соответственно; R_{i1} и R_{i2} — внутренние сопротивления генераторов $Г_1$ и $Г_2$ соответственно; $R_{зт}$ — входное сопротивление тиристора.

Основной недостаток этой схемы — наличие двух синхронизированных генераторов импульсов. Чтобы устранить взаимное влияние генераторов, их внутренние сопротивления R_{i1} и R_{i2} должны быть очень большими, что энергетически невыгодно. Кроме того, наличие диода *Д* приводит к дополнительному падению напряжения в схеме.

В схеме, приведенной на рис. 9,*б*, управление запираемым тиристором производится с помощью двух кнопок. В исходном состоянии конденсатор C_1 через резисторы R_1 и $R_н$ заряжен до напряжения источника питания *E* (полярность напряжения на конденсаторе C_1 указана на рисунке). При нажатии кнопки $Кн_1$ (*Вкл.*). происходит разряд конденсатора C_1 через входную цепь и тиристор переходит в проводящее состояние. Все напряжение оказывается приложенным к нагрузке, и конденсатор C_2 начинает заряжаться через резистор R_2 и $R_н$ до напряжения, равного напряжению на нагрузке (полярность напряжения на конденсаторе C_2 показана на рисунке). Отключение нагрузки производится нажатием кнопки $Кн_2$ (*Выкл.*). При этом конденсатор C_2 разряжается через управляющий электрод тиристора, обеспечивая его запирание.

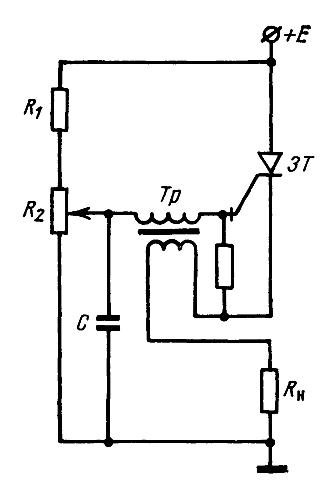


Рис. 10. Схема быстродействующего высокочастотного прерывателя.

Хорошие результаты дает схема переключателя (рис. 9,*в*), в которой совместно используются триодный и запираемый тиристоры, а нагрузка $R_н$ включается в катод тиристора *ЗТ*. Включение переключателя происходит при подаче положительного импульса $U_{вх}$ в цепь управляющего электрода тиристора *ЗТ*. Для запирания тиристора *ЗТ* необходимо открыть тиристор *ТТ*, подав на его вход импульс $U_у$. Если в качестве тиристора *ЗТ* используется прибор типа КУ204, то для его запирания достаточно подать в цепь управляющего электрода импульс с параметрами $I_з<5$ мА, $\tau_з=3$ мкс. Для обеспечения надежного переключения сопротивление резистора R_1 выбирается достаточно малым. После запирания тиристора *ЗТ* тиристор *ТТ* отключается от источника питания без применения каких-либо коммутирующих элементов.

Быстродействующий высокочастотный прерыватель. В подобных устройствах преимущества запираемых тиристоров проявляются в том, что они могут работать в пределах широкого диапазона токов и напряжений, обеспечивая при этом значительно большую

надежность по сравнению с обычными электромеханическими устройствами. Кроме этого, они способны весьма просто обеспечить широкий диапазон изменения частоты включения и выключения.

На рис. 10 [Л. 16] приведена одна из возможных схем прерывателя на постоянном токе. В ней используются запираемый тиристор $ЗТ$ и понижающий трансформатор $Тр$ с высоким коэффициентом трансформации. В исходном состоянии тиристор $ЗТ$ закрыт. Когда включается напряжение источника питания E, магнитопровод трансформатора $Тр$ начинает насыщаться. После насыщения магнитопровода напряжение на первичной обмотке трансформатора снижается и через резисторы R_1 и R_2 протекает положительный

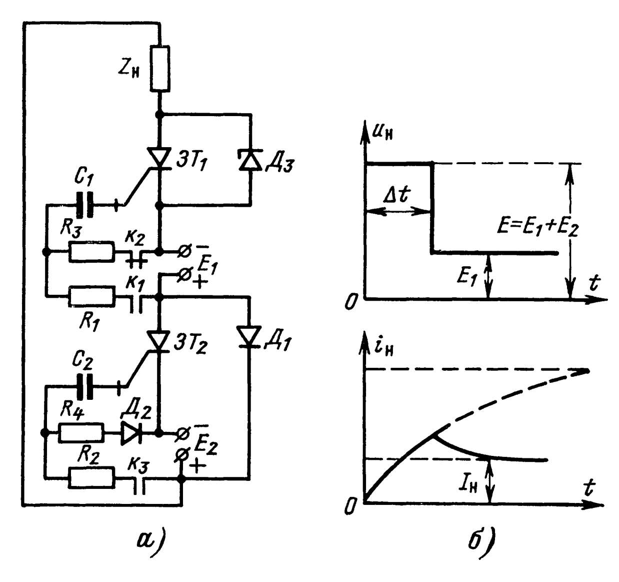


Рис. 11. Устройство для форсированного включения и отключения нагрузок.

ток, достаточный для отпирания тиристора. Вторичная обмотка трансформатора, имеющая небольшое количество витков, ускоряет процесс отпирания тиристора за счет положительной обратной связи. При открытом тиристоре ток в первичной обмотке трансформатора изменяет свое направление, так как катод и управляющий электрод тиристора имеют потенциал анода, и магнитопровод трансформатора выходит из состояния насыщения. Время открытого состояния тиристора определяется временем насыщения магнитопровода при обратном токе и может регулироваться с помощью потенциометра R_2. При насыщении магнитопровода трансформатора в цепи управляющего электрода возникает отрицательный импульс и тиристор запирается.

Тиристор является идеальным элементом для данного типа прерывателя благодаря своему быстродействию, обеспечивающему частоту переключений до 100 кГц.

Устройство для включения и отключения нагрузок. В ряде случаев необходимо обеспечить нарастание тока за определенный фиксированный отрезок времени Δt. Для реализации такого режима к нагрузке прикладывают ступенчатое напряжение. На рис. 11,*а* показана схема устройства, выходное напряжение которого имеет ступенчатую форму, а на рис. 11,*б* — переходные процессы [Л. 11].

Устройство содержит два запираемых тиристора $ЗТ_1$ и $ЗТ_2$, подключенных к двум источникам питания E_1 и E_2. Управление тиристорами осуществляется посредством попеременного заряда и разряда конденсаторов C_1 и C_2. Допустим, что контакты $к_1$, $к_3$ замкнуты, а контакт $к_2$ разомкнут. Тогда тиристор $ЗТ_1$ откроется по цепи $+E_1$, R_1, C_1, а $ЗТ_2$ — по цепи $+E_2$, R_2, C_2. При этом к нагрузке $Z_н$ окажется приложено суммарное напряжение источников питания $E=E_1+E_2$. В таком состоянии устройство будет находиться до тех пор, пока конденсатор C_2 не зарядится настолько, что диод $Д_2$ начнет проводить ток. Тогда конденсатор C_2 разряжается по цепи $Д_2R_4$ и на входе тиристора $ЗТ_2$ появляется отрицательное напряжение, которое запирает его. При этом источник питания E_2 отключается от нагрузки и ток нагрузки $I_н$ замыкается по цепи $+E_1$, $Д_1$, $Z_н$, $ЗТ_1$, $-E_1$.

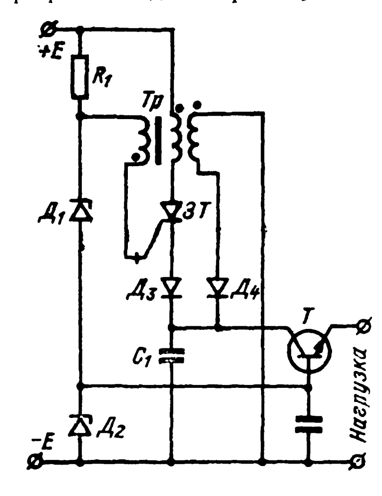


Рис. 12. Схема стабилизированного преобразователя напряжения.

Если теперь разомкнуть контакты $к_1$ и $к_3$ и замкнуть контакт $к_2$, конденсатор C_1 разрядится через резистор R_3 и закроет тиристор $ЗТ_1$, отключив, таким образом, нагрузку от источника питания.

В рассмотренной схеме ускорение процесса отключения нагрузки обеспечивается включением параллельно тиристору $ЗТ_1$ стабилитрона $Д_3$. В этом случае $U_{отк}=U_{ст}-E_1$, где $U_{ст}>E_1$ — напряжение стабилизации стабилитрона, $U_{отк}$ — напряжение отключения нагрузки.

Стабилизированный преобразователь напряжения. Запираемые тиристоры могут работать от источников постоянного тока с повышенным напряжением и осуществлять переключение на относительно высоких частотах. Это позволяет использовать их в схемах стабилизированных преобразователей напряжения (рис. 12) [Л. 16]. Здесь тиристор $ЗТ$ используется в качестве коммутирующего и регулирующего элемента. При включении источника питания E через резистор R_1 и левую обмотку трансформатора $Тр$ на управляющий электрод тиристора поступает положительный импульс. Сопротивление резистора R_1 выбирается из условия обеспечения необходимого тока управления тиристора $ЗТ$ при наименьшем питающем напряжении. Ток, протекающий через первичную обмотку трансформатора, не только ускоряет процесс отпирания тиристора $ЗТ$, но и уменьшает потери в цепи управляющего электрода.

Как только тиристор $3T$ откроется, конденсатор C_1 по цепи $+E$, средняя обмотка трансформатора, $3T$, $Д_3$, $-E$ начинает заряжаться до напряжения источника питания. При достижении напряжения на конденсаторе C_1 значения $U_c > U_{ст1} + U_{ст2}$, где $U_{ст1}$ и $U_{ст2}$ — напряжение стабилизации стабилитронов $Д_1$ и $Д_2$ соответственно, на управляющий электрод тиристора $3T$ поступает отрицательный импульс, обеспечивающий его запирание. Уменьшение времени запирания достигается за счет отрицательного импульса возникающего в левой обмотке при протекании через среднюю обмотку спадающего анодного тока.

После запирания тиристора $3T$ энергия, накопленная в первичной обмотке, передается через правую обмотку и диод $Д_4$ конденсатору C_1, который начинает разряжаться через нагрузку преобразователя. Процесс разряда конденсатора C_1 длится до тех пор, пока напряжение на нем не станет ниже суммарного напряжения стабилизации стабилитронов $Д_1$ и $Д_2$. В этот момент открывается тиристор $3T$ и процессы в преобразователе повторяются.

В приведенной схеме при изменении входного напряжения в два раза (от 100 до 200 В) выходное напряжение преобразователя меняется менее чем на 3%. Коэффициент полезного действия схемы сравнительно невысок (около 50%) за счет больших потерь энергии в резисторе R_1. Пульсации напряжения преобразователя сглаживаются эмиттерным повторителем, выполненным на транзисторе T. Он же обеспечивает низкое выходное сопротивление схемы.

Переключатели переменного тока. Коммутацию сигналов переменного тока малой мощности можно осуществить с помощью запираемых тиристоров. На рис. 13,*а* [Л. 1] представлена диодно-

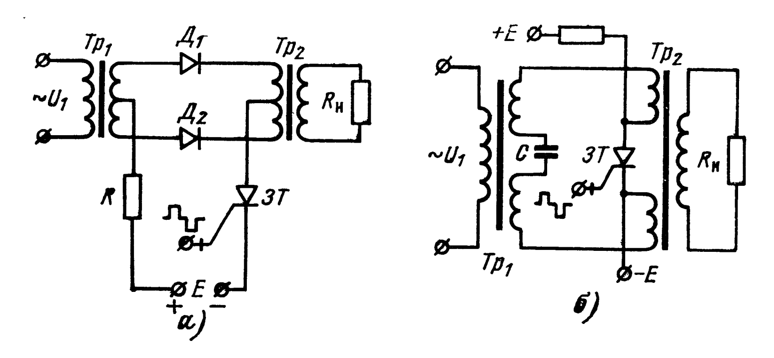


Рис. 13. Схемы переключателей переменного тока.

трансформаторная ключевая схема. Отпирание и запирание тиристора $3T$ осуществляются по управляющему электроду подачей разнополярных импульсов. При включенном источнике питания E и положительном входном импульсе $U_{вх}$ тиристор $3T$ открывается, диоды $Д_1$ и $Д_2$ открыты и переменный сигнал U_1 через трансформаторы $Тр_1$ и $Тр_2$ поступает на нагрузку $R_н$. Если тиристор закрыт (входной импульс $U_{вх}$ — отрицательный), то диоды $Д_1$ и $Д_2$ оказываются включенными встречно, что препятствует протеканию тока.

Для обеспечения надежной работы переключателя элементы схемы выбирают из следующих условий:

$$I_0 > I_{\text{макс}};\ I_0 = (0{,}2 \div 0{,}4) I_{\text{д.макс}},$$

где $I_{\text{д.макс}}$ — максимальный выпрямленный ток диода; $I_{\text{макс}}$ — амплитуда коммутируемого переменного тока; I_0 — постоянная составляющая тока через диоды $Д_1$ и $Д_2$.

Резистор R выбирается из условия обеспечения режима работы тиристора $3T$.

Источник питания E должен быть выбран таким образом, чтобы $2I_0 = (1{,}3 \div 1{,}5) I_{\text{выкл}}$. При этом мощность источника питания определяется выражением $P = 2I_0E$.

На рис. 13,*б* [Л. 9] приведена схема переключателя переменного тока, в котором отсутствуют диоды. При подаче положительного сигнала управления на тиристор $3T$ он открывается и сигнал переменного тока U_1 проходит к нагрузке $R_{\text{н}}$, так как включенный тиристор соединяет первичные обмотки трансформатора $Тр_2$ со вторичными обмотками трансформатора $Тр_1$. При подаче отрицательного сигнала управления тиристор $3T$ запирается и между первичными обмотками трансформатора $Тр_2$ окажется включенным сопротивление, равное сопротивлению закрытого тиристора.

Устойчивая работа схемы обеспечивается при выполнении неравенства $I_{\text{макс}} - I_0 > I_{\text{выкл}}$, где I_0 — постоянная составляющая тока, протекающая через тиристор $3T$.

Выбор источника питания E производится из тех же соображений, что и в схеме, представленной на рис. 13,*а*.

ИМПУЛЬСНЫЕ СХЕМЫ НА ЗАПИРАЕМЫХ ТИРИСТОРАХ

Выбор режима работы. Режим работы тиристора определяется положением рабочей точки на статической вольт-амперной характеристике. На рис. 14 приведены вольт-амперная характеристика и нагрузочные прямые для наиболее характерных режимов работы тиристора.

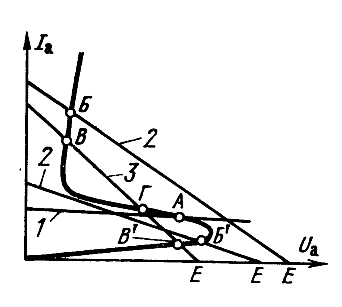


Рис. 14. Режимы работы тиристора.

Режим I. Положение равновесия рабочей точки *А* неустойчиво (нагрузочная прямая *1*). В этом режиме тиристор работает как автогенератор. Вид колебаний (релаксационные или синусоидальные) зависит от соотношения реактивных элементов схемы (L и C).

Режим II. Положение равновесия рабочей точки *Б* (*Б'*) устойчиво (нагрузочные прямые *2*). В этом режиме тиристор работает как усилитель импульсов или одновибратор. Режим усиления выбирается таким образом, чтобы рабочая точка находилась на участке, соответствующем положению точки *Б'*. В этом случае схема из любого возможного состояния (точка *Б*) будет возвращаться в точку *Б'* с устойчивым состоянием равновесия.

Режим III. Нагрузочная прямая *3* пересекает вольт-амперную характеристику в трех точках, две из которых (*В* и *В'*) имеют

устойчивое, а одна (точка Γ) неустойчивое положения равновесия. В этом режиме схема работает как генератор с двумя устойчивыми состояниями. Для перевода схемы из одного устойчивого состояния в другое необходимо подать запускающий импульс на управляющий электрод тиристора.

Таким образом, запираемые тиристоры можно использовать практически в любом из рассмотренных режимов. Наибольшее распространение получили устройства, в которых запираемый тиристор используется как ключевой прибор, управляемый импульсными сигналами. Ниже будут рассмотрены импульсные схемы на тиристорах, работающих во всех трех режимах.

Мультивибраторы. Мультивибратор представляет собой генератор релаксационных колебаний. Перевод схемы из устойчивого состояния в неустойчивое происходит при воздействии внешнего запускающего импульса. В неустойчивом состоянии схема находится в течение некоторого времени, определяемого параметрами схемы, а затем автоматически скачком возвращается в первоначальное устойчивое состояние.

На рис. 15 приведена схема одновибратора (ждущего мультивибратора) [Л. 4]. В состоянии покоя, т. е. до подачи запускающего импульса, тиристоры *ТТ* и *ЗТ* закрыты. Положительный запускающий импульс, поданный на вход схемы, открывает тиристор *ЗТ*. В этот момент к нагрузке $R_н$ прикладывается напряжение источника питания E и конденсатор C заряжается. Тиристор *ТТ* открывается при разряде конденсатора C, когда напряжение на нем достигнет напряжения стабилизации стабилитрона $Д_2$. Включение тиристора *ТТ* приводит к запиранию тиристора *ЗТ* и отключению нагрузки от источника питания. Для этого достаточно обеспечить выполнение следующих условий:

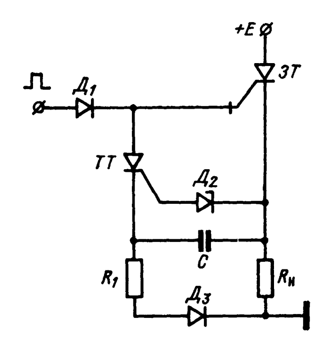


Рис. 15. Схема одновибратора на запираемом тиристоре.

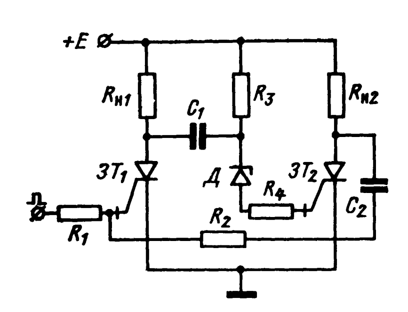


Рис. 16. Схема одновибратора на запираемом тиристоре с двумя выходными цепями.

$$(U_{ст} + U_{спр.тт})K_{з} = 2,7 I_{н} r_{вх};$$

$$r_{вх} C \geqslant \tau_{з},$$

где $U_{ст}$ напряжение стабилизации стабилитрона $Д_2$; $r_{вх}=\frac{U_з}{I_з}$ — входное сопротивление тиристора $ЗТ$; $\tau_з$ — длительность запирающего импульса.

После разряда конденсатора C через тиристор $ТТ$ последний запирается и схема возвращается в исходное состояние.

Сопротивление резистора R_1 ограничивается неравенством

$$\frac{E}{I_д}<R_1<\frac{E-U_{ст}-U_{спр.тт}}{I_{спр.тт}},$$

где $I_д$ — максимальный прямой ток через диод $Д_3$.

Длительность формируемого импульса определяется выражением

$$\tau_{фор}=R_1C\ln\frac{E}{E-U_{ст}-U_{спр.тт}}.$$

Другой вариант схемы одновибратора [Л. 2] с двумя выходными цепями приведен на рис. 16. В исходном состоянии тиристор $ЗТ_1$ закрыт, а $ЗТ_2$ открыт и через управляющий электрод $ЗТ_2$ протекает ток. При подаче положительного импульса на вход схемы тиристор $ЗТ_1$ открывается, а $ЗТ_2$ закрывается током разряда конденсатора C_1. Повторное включение $ЗТ_2$ происходит после того, как напряжение на конденсаторе C_1 станет равным напряжению стабилизации стабилитрона $Д$. При этом конденсатор C_2 разряжается по цепи резистор R_2, управляющий электрод $ЗТ_1$, земля и закрывает тиристор $ЗТ_1$.

В рассмотренной схеме длительность формируемого импульса можно определить из условия

$$\tau_{фор}=R_3C_1\ln\frac{E-U_{ст}}{2E-U_{ст}}>\tau_з,$$

где $U_{ст}$ — напряжение стабилизации стабилитрона $Д$.

Мультивибратор с временной задержкой. В схеме, показанной на рис. 17, совместно используются запираемый тиристор и однопереходной транзистор *ОПТ* [Л. 16]. Схемы управления на *ОПТ* характеризуются простотой, компактностью, экономичностью и поэтому очень удобны для управления тиристорами. Однопереходной транзистор представляет собой ключевой полупроводниковый прибор с отрицательным сопротивлением, имеющий три вывода: эмиттер (*Э*), базу 1 ($Б_1$) и базу 2 ($Б_2$). Участок между базами имеет характер линейного омического сопротивления. Если напряжение между эмиттером и базой 1 меньше некоторого определенного значения $U_{э.макс}$, переход $Э—Б_1$ смещен в обратном направлении и через него протекает лишь небольшой ток утечки. Как только напряжение на эмиттере $U_э$ превысит напряжение $U_{э.макс}$, *ОПТ* открывается и сопротивление между выводами *Э* и $Б_1$ падает до 5—20 Ом.

Напряжение $U_{э.макс}$ связано с междубазовым напряжением $U_{Б1Б2}$ соотношением

$$U_{э.макс}=KU_{Б1Б2}+U_0,$$

где K — коэффициент, определяющий соотношение порога срабатывания однопереходного транзистора и питающего напряжения, $K=0,6\div0,8$; U_0 — напряжение на переходе эмиттер-база 1, $U_0\approx0,5$ В.

Пусть на тиристор *ЗТ* и транзистор *ОПТ* подано напряжение источника питания E. Тогда тиристор *ЗТ* откроется и конденсатор C_1 через резистор R_1 и управляющий электрод тиристора начнет заряжаться (полярность напряжения на конденсаторе указана на рисунке). Как только напряжение на конденсаторе C_1 достигнет

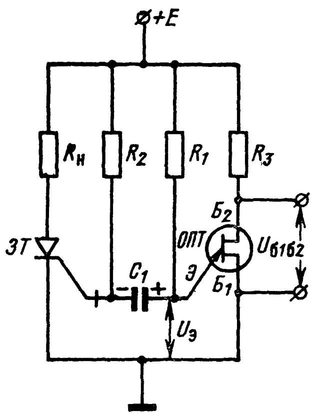


Рис. 17. Схема мультивибратора с временно́й задержкой.

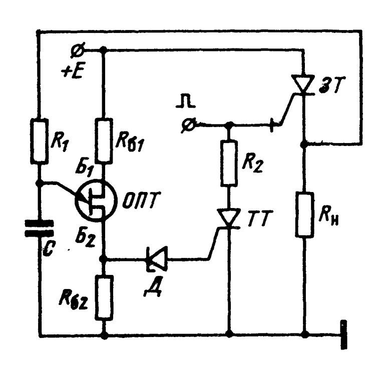


Рис. 18. Схема выключателя с временно́й задержкой.

значения $U_{э.макс}$, открывается транзистор *ОПТ*. Напряжение на переходе *Э—Б*$_1$ резко уменьшается, и на управляющем электроде тиристора *ЗТ* появляется отрицательное напряжение, которое запирает последний. Конденсатор C_1 начинает перезаряжаться через резистор R_2 и переход *Э—Б*$_1$ таким образом, что напряжение на его левой (по схеме) обкладке стремится к напряжению источника питания E. Как только напряжение на конденсаторе C_1 достигает значения, необходимого для отпирания тиристора *ЗТ*, последний открывается. С анода тиристора снимаются прямоугольные импульсы, частота следования которых обратно пропорциональна емкости конденсатора C_1. При необходимости с базы *Б*$_2$ транзистора *ОПТ* можно снять импульсы меньшей мощности. После отпирания тиристора *ЗТ* ток через конденсатор C_1 уменьшается и транзистор *ОПТ* закрывается. Далее процессы в схеме повторяются. Время открытого и закрытого состояния тиристора определяется сопротивлением резисторов R_2 и R_1 соответственно.

На рис. 18 показана высокостабильная схема временно́й задержки импульсов [Л. 14]. В схеме используются запираемый тиристор *ЗТ*, триодный тиристор *ТТ* и однопереходной транзистор *ОПТ*. При отсутствии управляющего импульса тиристор *ЗТ* закрыт, напряжение на его катоде отсутствует и поэтому закрыты тиристор *ТТ* и транзистор *ОПТ*. Управляющий импульс открывает тиристор *ЗТ* и напряжение на катоде тиристора увеличивается до значения $E—U_{ост}$. Конденсатор C начинает заряжаться через резистор R_1, сопротивление которого обычно несколько десятков килоом. Процесс

заряда конденсатора длится до тех пор, пока напряжение на нем не достигнет значения, при котором переход эмиттер — база 1 транзистора *ОПТ* смещается в прямом направлении и транзистор открывается. Теперь конденсатор *С* разряжается через открытый *ОПТ* и параллельно соединенные резистор $R_{б2}$ и управляющую цепь тиристора *ТТ*, открывая его. Тиристор *ТТ* шунтирует управляющий электрод тиристора *ЗТ*, отключая нагрузку от источника питания. Рассмотренная схема, выполненная с применением запираемого тиристора 2У102Б, позволяет получить задержку от 1 до 50 мкс при изменении напряжения источника питания *Е* на 15%.

Приведенные на рис. 17 и 18 схемы отличаются простотой, экономичностью, высокой помехоустойчивостью и дают достаточно точную временну́ю задержку.

Мультивибратор с емкостной связью. На рис. 19 приведена наиболее распространенная схема мультивибратора на запираемых тиристорах с емкостными связями [Л 2]. Мультивибратор состоит из двух усилительных каскадов на резисторах. Выход каждого каскада соединен со входом другого каскада через конденсаторы C_2 и C_4.

Если каскады мультивибратора выполнены на однотипных тиристорах с использованием одних и тех же элементов, выходные

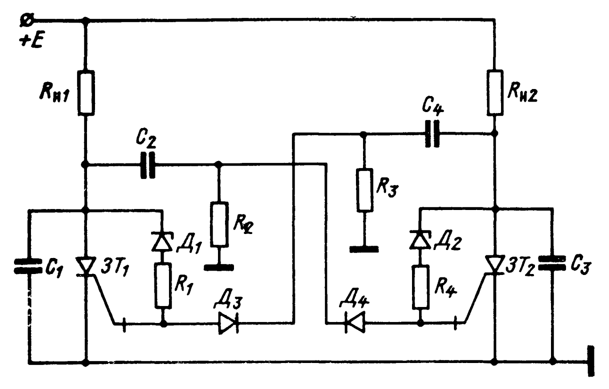


Рис. 19. Схемы мультивибратора с емкостной связью.

импульсы напряжения одного и другого каскада будут одинаковыми по длительности и амплитуде. Такие мультивибраторы называются симметричными. На практике чаще применяют несимметричные мультивибраторы.

Описываемый здесь мультивибратор является симметричным. Рассмотрим его работу. При включении источника питания *Е* конденсатор C_1 начинает заряжаться. Как только напряжение на конденсаторе C_1 достигнет напряжения стабилизации стабилитрона $Д_1$, через управляющий электрод тиристора $ЗТ_1$ потечет ток, который переключит тиристор в проводящее состояние. Тиристор $ЗТ_2$ в этот момент закрыт, так как постоянная времени цепи $R_{н2}C_3$ больше, чем цепи $R_{н1}C_1$ при равенстве напряжений стабилизации стабилитронов $Д_1$ и $Д_2$. После включения тиристора $ЗТ_1$ конденсатор C_1 начинает разряжаться через открытый тиристор, а конденсатор C_3 — заря-

жаться от источника питания. При достижении напряжения на конденсаторе C_3 уровня напряжения стабилизации стабилитрона $Д_2$ тиристор $ЗТ_2$ открывается, а $ЗТ_1$ закрывается током разряда конденсатора C_4. Далее процессы повторяются. Для предотвращения ложного срабатывания тиристоров $ЗТ_1$ и $ЗТ_2$ в цепи управляющих электродов включены диоды $Д_3$ и $Д_4$.

Период повторения импульсов определяется по формуле

$$T = R_{н1}C_1 \ln\frac{E - U_{ст1}}{E} - R_{н2}C_3 \ln\frac{E - U_{ст2}}{E},$$

где $U_{ст1}$ и $U_{ст2}$ — напряжения стабилизации диодов $Д_1$ и $Д_2$ соответственно.

В рассмотренной схеме вместо стабилитронов $Д_1$ и $Д_2$ можно использовать диодные тиристоры. Однако следует учитывать, что напряжение включения этих приборов имеет значительный разброс, что затрудняет надежное переключение схемы.

Триггеры. Триггерами называют импульсные устройства, имеющие два устойчивых состояния равновесия. В отличие от ждущих мультивибраторов триггеры переключаются из одного состояния равновесия в другое только при воздействии на него второго запускающего импульса.

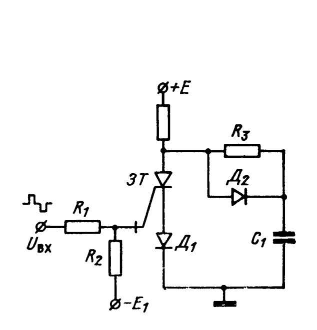


Рис. 20. Схема триггера на запираемом тиристоре.

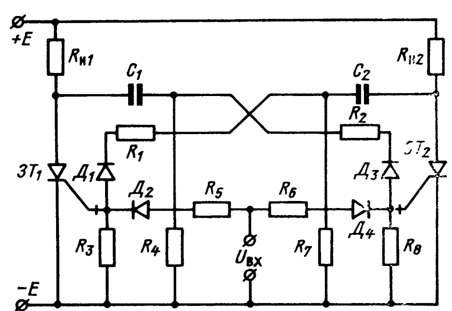


Рис. 21. Схема триггера с совмещенным входом.

Триггер, схема которого показана на рис. 20 [Л. 9], срабатывает от разнополярных импульсов, поступающих на его вход. Запуск триггера осуществляется импульсом положительной полярности. Амплитуда запускающих импульсов должна удовлетворять условию

$$U_{вх} \geqslant I_у R_1.$$

Для запирания тиристора необходимо выполнение следующих условий:

$$\tau_з > t_{выкл};$$

$$\frac{K_з U_з}{R_1 + r_{вх.макс}} \geqslant I_н,$$

где $r_{вх.макс}$ — максимальное входное сопротивление закрытого тиристора $ЗТ$; $I_н$ — ток нагрузки.

Диод $Д_1$, включенный в катодную цепь тиристора $ЗТ$, служит для уменьшения тока утечки при отрицательном смещении на управляющем электроде. Источник смещения E_1 стабилизирует выключенное состояние тиристора $ЗТ$.

Дополнительная цепочка R_3C_1 $Д_2$ существенно повышает устойчивость триггера к внешним помехам, возникающим в цепи источника питания E.

На рис. 21 приведена схема триггера с совмещенным входом [Л. 1, 9]. Предположим, что тиристор $ЗТ_2$ закрыт, а $ЗТ_1$ открыт. Конденсатор C_2 при этом заряжен до напряжения источника питания E через резисторы $R_{н2}$ и R_7. Тиристор $ЗТ_2$ открывается при подаче следующего запускающего импульса $U_{вх}$. В этом случае через резистор $R_{н2}$ протекает ток нагрузки, равный $E/R_{н2}$. Конденсатор C_2 начинает разряжаться через открытый тиристор $ЗТ_2$, закрывая тиристор $ЗТ_1$. Как только тиристор $ЗТ_1$ закроется, начинает заряжаться конденсатор C_1 по цепи $+E$, $R_{н1}$, R_4, $-E$. Далее процессы в триггере повторяются.

Диоды $Д_1$ и $Д_3$ защищают управляющие электроды тиристоров $ЗТ_1$ и $ЗТ_2$ от положительных импульсов напряжения, возникающих во время заряда конденсаторов C_1 и C_2.

Элементы схемы триггера выбираются из следующих соотношений:

$$C_1 = C_2 = \frac{\tau_з}{R_э \ln \frac{I_{з.макс}}{I_{з.мин}}};$$

$$R_э = \frac{R_4(R_1 + R_0)}{R_0 + R_1 + R_4};$$

$$R_0 = \frac{R_3 r_{вх}}{R_3 + r_{вх}},$$

где $R_э$ — эквивалентное сопротивление цепи разряда конденсаторов; $I_{з.макс}$ и $I_{з.мин}$ — соответственно максимальный и минимальный ток запирания тиристора; $r_{вх}$ — входное сопротивление запираемого тиристора.

Суммарное сопротивление цепи заряда конденсаторов

$$R_4 + R_{н1} = \frac{3\tau_{зар}}{C_1},$$

где $\tau_{зар}$ — постоянная цепи заряда.

Максимальная частота следования входных импульсов

$$\frac{1}{f_{макс}} \geqslant 3\tau_{зар}.$$

Рассмотренная схема может быть использована для запуска тиристоров большей мощности, работающих в инверторах, модуляторах и других устройствах.

Триггер с катодной нагрузкой. На рис. 22 показана схема триггера с катодной нагрузкой [Л. 13, 14]. Триггер работает следующим образом. После включения напряжения питания тиристор $ЗТ_1$ открывается за счет тока протекающего по цепи R_1, R_2, сопротив-

ление управляющего электрода тиристора $ЗТ_1$, нагрузка $R_н$. В это время тиристор $ЗТ_2$ закрыт. Переключение схемы происходит после подачи запускающего импульса на тиристор $ЗТ_2$. Открытый тиристор $ЗТ_2$ шунтирует управляющую цепь тиристора $ЗТ_1$, исключая его ложное срабатывание. С приходом следующего отрицательного импульса тиристор $ЗТ_2$ закрывается, а $ЗТ_1$ открывается. Далее процессы в схеме повторяются.

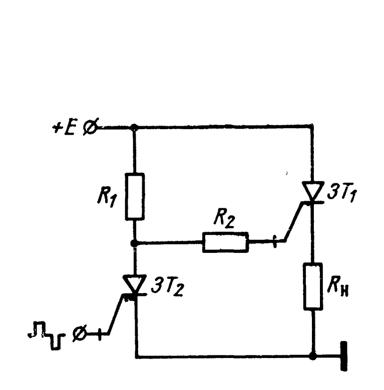


Рис. 22. Схема триггера с катодной нагрузкой.

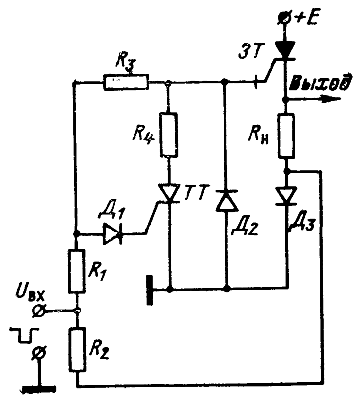


Рис. 23. Схема усилителя импульсных сигналов.

Для устойчивой работы схемы необходимо выполнение следующих условий:

$$I_у = \frac{E}{R_1 + R_2 + r_{вх} + R_н} > I_{спр};$$

$$\frac{E - U_{ост}}{I_а} > R_н > \frac{E - U_{ост}}{I_{выкл}},$$

где $I_а$ — максимально допустимый анодный ток тиристора $ЗТ_1$; $U_{ост}$ — остаточное напряжение на открытом тиристоре $ЗТ_1$; $r_{вх}$ — входное сопротивление тиристора $ЗТ_1$.

Недостатком схемы является зависимость токов включения и выключения тиристора $ЗТ_1$ от сопротивления резистора R_2. Этот недостаток можно устранить, если разделить цепи включения и выключения тиристора $ЗТ_1$ (например, с помощью диода).

Усилители импульсных сигналов. Схемы усилителей импульсов обеспечивают большой коэффициент усиления по мощности ($K_р = 10^4 \div 10^5$), удобны в настройке и позволяют получать на выходе сигналы, близкие к прямоугольной форме.

Усилитель [Л. 4, 5], схема которого представлена на рис. 23, открывает и закрывает тиристор $ЗТ$ в моменты, соответствующие нарастанию и спаду усиливаемого импульса, и обеспечивает малый уровень искажений сигнала. В этой схеме нагрузка включена в цепь катода запираемого тиристора, что дает возможность получить на выходе схемы импульсы положительной полярности. При отсутствии входного сигнала тиристоры $ТТ$ и $ЗТ$ закрыты и

устройство не потребляет энергии от источника питания. В момент подачи на вход усилителя сигнала отрицательной полярности $U_{вх}$ тиристор *3T* открывается и через нагрузку $R_н$ протекает ток, формируя передний фронт выходного импульса. После отпирания тиристора *3T* к аноду диода $Д_1$ прикладываются положительное напряжение источника питания через резистор R_3, так как потенциал управляющего электрода тиристора *3T* практически равен потенциалу его катода, и отрицательное напряжение $U_{вх}$. Диод $Д_1$ закрыт, пока выполняется условие

$$R_3 U_{вх} > \left(R_1 + R_г + \frac{R_г R_1}{R_2} \right) E,$$

где $R_г$ — внутреннее сопротивление источника входного сигнала.

Поэтому до окончания воздействия входного сигнала напряжение на управляющий электрод тиристора *TT* не поступает. После окончания входного импульса диод $Д_1$ открывается и при $R_3 < \frac{E - U_{спр.тт}}{I_{спр.тт}}$ открывается тиристор *TT*. Одновременно закрывается тиристор *3T*, отключая от источника питания тиристор *TT* и нагрузку $R_н$. В этот момент на сопротивлении нагрузки формируется задний фронт импульса, после чего схема возвращается в исходное состояние.

Генератор импульсов. Принцип действия схемы, приведенной на рис. 24 [Л. 16], заключается в следующем. При подаче входного

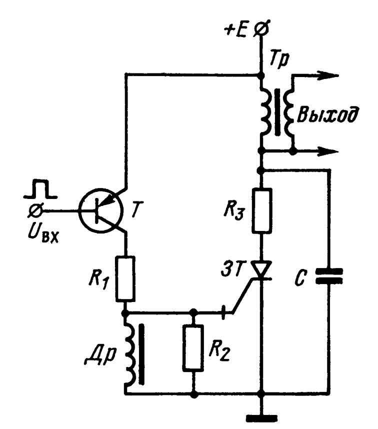


Рис. 24. Схема генератора импульсов.

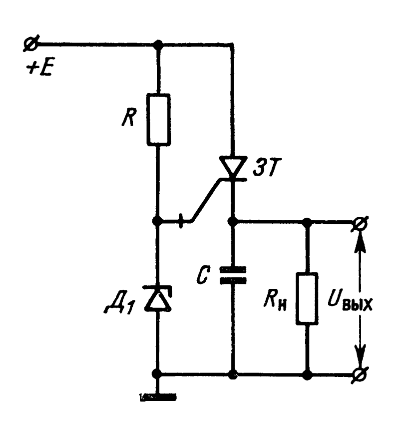


Рис. 25. Схема генератора пилообразного напряжения.

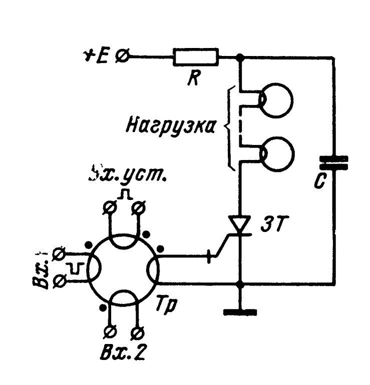
сигнала на базу транзистора *T* последний открывается и через резистор R_1 начинает протекать ток, открывающий тиристор *3T*. После отпирания тиристора токи в дросселе *Др* и первичной обмотке трансформатора *Тр* начинают нарастать. Как только транзистор *T* закроется, возникает импульс тока, обусловленный э. д. с. самоиндукции дросселя, который закрывает тиристор *3T*. При этом во вторичной обмотке трансформатора *Тр* появляются высокочасто-

ные колебания, возникающие за счет наличия в схеме колебательного контура, образованного индуктивностью трансформатора и емкостью конденсатора *С*. Частота этих колебаний определяется параметрами трансформатора и емкостью конденсатора.

Схема, представленная на рис. 24, может быть использована в качестве генератора импульсов в автомобильных системах зажигания. В этом случае вместо трансформатора *Тр* устанавливается специальная катушка зажигания.

Генератор пилообразного напряжения. Генераторы линейно изменяющегося напряжения применяются для развертки электронного луча в электронно-лучевых трубках телевизионных, осциллографических и других устройств, а также в схемах сравнения для задержки импульсов по времени и т. п.

На рис. 25 показана схема генератора пилообразного напряжения, в которой функцию ключа выполняет запираемый тиристор *ЗТ*. При подаче напряжения питания *Е* тиристор *ЗТ* открывается и напряжение источника питания оказывается приложенным к конденсатору *С*. Конденсатор начинает заряжаться. Как только напряжение на конденсаторе *С* достигнет напряжения стабилизации стабилитрона $Д_1$, управляющий электрод *ЗТ* оказывается смещенным в обратном направлении и тиристор закрывается. После этого происходит разряд конденсатора *С* через резистор $R_н$. Следующий цикл начнется в момент, когда напряжение на конденсаторе станет меньше напряжения стабилизации стабилитрона $Д_1$ и через управляющий электрод тиристора *ЗТ* начнет протекать ток положительной полярности.



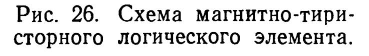


Рис. 26. Схема магнитно-тиристорного логического элемента.

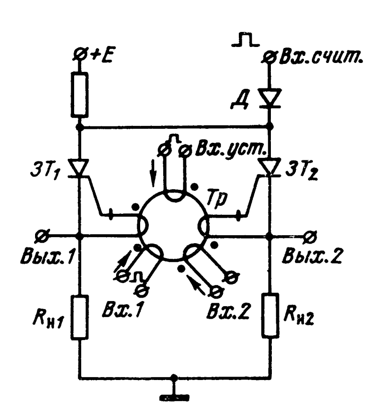


Рис. 27. Схема универсального магнитно-тиристорного логического элемента.

Логические элементы на запираемых тиристорах. Широко известные магнитно-диодные и магнитно-транзисторные логические элементы, несмотря на их простоту и надежность, имеют ряд существенных недостатков. Так, магнитно-диодные элементы имеют низкий коэффициент усиления, что заставляет применять усилители в сложных логических схемах и бороться с помехами. Магнитно-транзисторные элементы имеют недостаточно высокий коэффициент раз-

множения, т. е. не позволяют разветвлять поступающую информацию на большое число элементов.

Применение запираемых тиристоров позволяет создать высоконадежные логические элементы, свободные от указанных выше недостатков [Л. 6, 15].

На рис. 26 приведена логическая схема, выполняющая функцию тождества [Л. 4, 6]. Схема состоит из запираемого тиристора *ЗТ*, трансформатора *Тр* с четырьмя обмотками, конденсатора *С* и нагрузки, выполненной в виде обмоток трансформаторов, включенных последовательно с тиристором. С их помощью осуществляется разветвление информации на последующие логические элементы.

При рассмотрении работы схемы предположим, что тиристор *ЗТ* закрыт. В этом случае конденсатор *С* заряжен до напряжения источника питания *Е*. При подаче запускающего импульса на входное устройство (*Вх. уст.*) трансформатора *Тр* открывается тиристор *ЗТ*, конденсатор С разряжается и на нагрузке формируются выходные импульсы. Для запирания тиристора на любой из входов *Вх. 1* или *Вх. 2* подается отрицательный импульс.

Сопротивление резистора *R* выбирается из условия [Л. 4]

$$\frac{E-U_{\text{вкл}}}{I_{\text{вкл}}}<R_{\text{н}}+R<\frac{E}{I_{\text{выкл}}}.$$

Емкость конденсатора *С* выбирается из условия обеспечения длительности выходного импульса, достаточной для запирания последующих логических ячеек.

Универсальная схема магнитно-тиристорного логического элемента [Л. 4] приведена на рис. 27. Она собрана на двух запираемых тиристорах, управляемых с помощью трансформатора *Тр*, имеющего несколько обмоток. В начальный момент на входное устройство *Вх. уст.* трансформатора подается установочный импульс, который открывает тиристор $ЗТ_2$. При этом тиристор $ЗТ_1$ запирается отрицательным током, снимаемым с одной из обмоток трансформатора *Тр*. Это так называемое исходное состояние. С приходом на вход *Вх. 1* положительного импульса открывается тиристор $ЗТ_1$ и закрывается тиристор $ЗТ_2$ и, таким образом, происходит запись информации. Считывание информации производится в третьем такте при подаче на вход *Вх. счит.* импульса считывания, который в зависимости от состояния тиристоров $ЗТ_1$ и $ЗТ_2$ проходит на один из выходов: *Вых. 1* (прямой) или *Вых. 2* (инверсный). Используя комбинации входов и выходов схемы, на таком логическом элементе можно реализовать любую логическую функцию.

Рассмотренные на рис. 27 и 28 логические элементы с использованием запираемых тиристоров имеют ряд преимуществ по сравнению с магнитно-транзисторными схемами. Применение запираемых тиристоров с малым временем запирания дает возможность использовать малогабаритные трансформаторы с небольшим количеством витков. Кроме того, благодаря большому коэффициенту усиления амплитуда выходных импульсов тока может достигать нескольких ампер при мощности управления, равной долям милливатт.

Регистр сдвига. Регистр сдвига представляет собой устройство, которое под действием управляющего (тактового) импульса сдвигает поступающую на вход информацию на один разряд. Сигналы на выходе и входе регистров могут принимать лишь два возможных

значения и кодируются в двоичной системе счисления следующим образом: низкий потенциал (отсутствие импульса) кодируется цифрой 0, а высокий потенциал (наличие импульса) кодируется цифрой 1.

На рис. 28 изображена схема регистра сдвига, выполненного на запираемых тиристорах [Л. 9]. Для устойчивой работы каждого из тиристоров необходимо выполнение условия $E<U_{вкл}$. Пусть в исходном состоянии тиристор $ЗТ_1$ закрыт, а $ЗТ_2$ и $ЗТ_3$ открыты. Тогда конденсатор C_1 заряжен до напряжения источника питания E. При подаче на вход схемы тактового импульса откры-

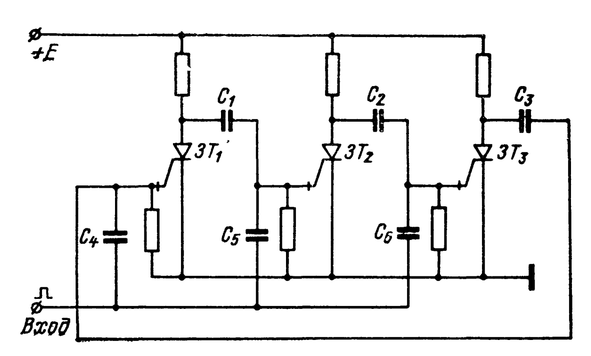


Рис. 28. Схема регистра сдвига на запираемых тиристорах.

вается тиристор $ЗТ_1$ и конденсатор C_1 разряжается через него. Ток разряда конденсатора C_1, протекая через управляющий электрод тиристора $ЗТ_2$, закрывает последний. С приходом следующего тактового импульса тиристор $ЗТ_2$ открывается и закрывается тиристор $ЗТ_3$. Информация сдвигается на один разряд. Далее процессы в схеме повторяются.

Рассмотренная схема может быть использована для накопления и хранения информации, а также для временной задержки импульсов.

Кольцевые счетчики импульсов. Кольцевые счетчики импульсов на запираемых тиристорах обладают рядом преимуществ перед транзисторными: бо́льшая стабильность работы при изменении напряжения питания и температуры окружающей среды, более высокая надежность и т. д. Кроме того, возможность поочередно коммутировать нагрузки относительно большой мощности позволяет включать индикаторные элементы и устройства сигнализации непосредственно в цепь счетчика.

На рис. 29 приведена схема кольцевого счетчика импульсов, выполненного на запираемых тиристорах [Л. 7, 9]. В этой схеме включение нагрузки происходит при подаче запускающего импульса сдвига. В анодные цепи тиристоров $ЗТ$ включены индикаторные лампы, которые позволяют непосредственно наблюдать за процессами счета импульсов.

В исходном состоянии (при включенном напряжении источника питания E) все тиристоры закрыты. При нажатии кнопки *Кн* (Запуск) открывается тиристор $ЗТ_1$ и к лампе $Л_1$ прикладывается

напряжение источника питания E. В этот момент диоды $Д_1$, $Д_3$, $Д_5$ закрыты, причем диоды $Д_1$, $Д_5$ за счет напряжения источника питания $+E$, а диод $Д_3$ за счет падения напряжения на открытом тиристоре $ЗТ_1$.

При подаче импульса сдвига положительной полярности амплитудой $U_{вх}<E$ диоды $Д_1$ и $Д_5$ не пропустят его на вход тиристоров $ЗТ_1$ и $ЗТ_3$. Поэтому откроется только тиристор $ЗТ_2$ через диод $Д_3$ и конденсатор C_4. С этого момента конденсатор C_5 разряжается по цепи $ЗТ_2$, R_6, $Д_2$, R_4 и закрывает тиристор $ЗТ_1$, так как к управляющему электроду $ЗТ_1$ оказывается приложенным импульс отрицательной полярности. С приходом следующего импульса сдвига

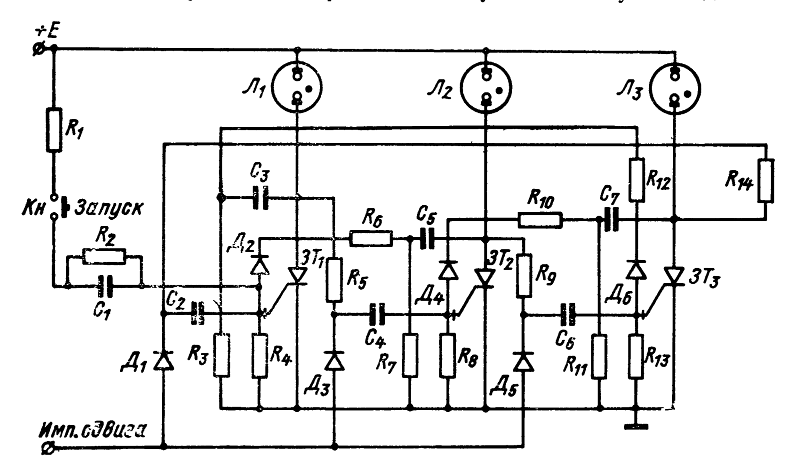


Рис. 29. Схема кольцевого счетчика импульсов.

открывается тиристор $ЗТ_3$ и закрывается $ЗТ_2$, т. е. происходит сдвиг информации и включается следующая индикаторная лампа $Л_2$.

В рассмотренной схеме импульсы запирания формируются непосредственно в анодной цепи тиристоров, поэтому отпадает необходимость использования достаточно мощных источников запирающих импульсов. По сравнению со схемами на триодных тиристорах этот счетчик импульсов обеспечивает большее быстродействие, ибо запирание тиристора $ЗТ$ происходит по цепи управления.

Схему, изображенную на рис. 30,*а* [Л. 4], можно использовать как в качестве кольцевого счетчика импульсов, так и в качестве регистра сдвига. Схема включает в себя: счетчик (тиристоры TT_1—TT_4 с относящимися к ним элементами и генератор импульсов (тиристоры TT_0 и $ЗТ$ с относящимися к ним элементами).

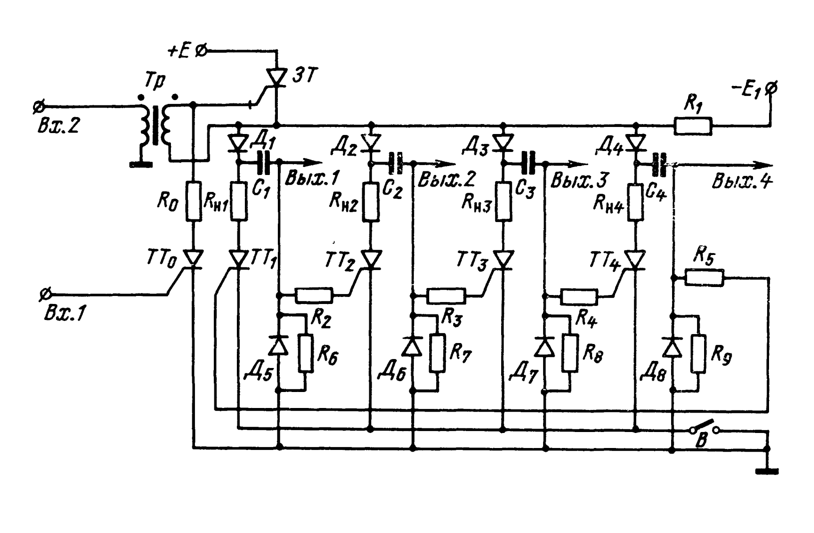
Генератор импульсов предназначен для запирания тиристоров счетчика. Режим работы генератора выбирается из условия

$$\frac{E+E_1}{R_1} > I_{а\,мин},$$

где $I_{а.мин}$ — минимальный анодный ток открытого тиристора $ЗТ$.

При выполнении этого неравенства тиристор $ЗТ$ сохраняет открытое состояние.

Для удобства рассмотрения процессов в счетчике примем: $C_1=C_2=\ \ldots\ C$ и $R_{н1}=R_{н2}=\ \ldots\ R_н$. Пусть выключатель $В$ замкнут, конденсаторы C_1—C_4 заряжены до напряжения источника питания E и тиристоры TT_1 и TT_2 открыты. Как только на вход *Вх. 1* поступает управляющий импульс (рис. 30,*б*), открывается тиристор TT_0



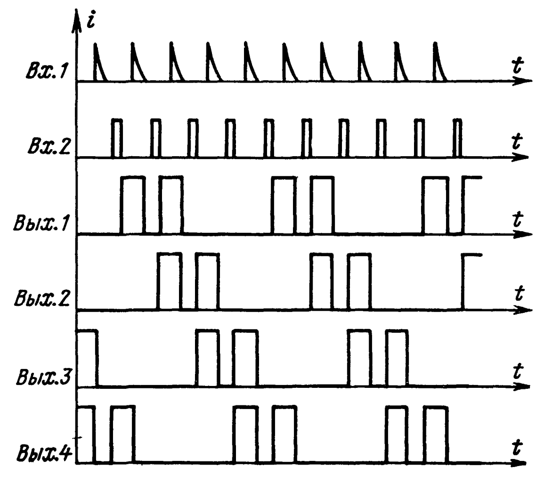


Рис. 30. Универсальная кольцевая пересчетная схема (*а*) и осциллограммы импульсов тока (*б*).

и тиристор $3T$ закрывается при выполнении условий

$$\frac{R_н}{n} > \frac{R_0}{K_з - 1},$$

где n — число проводящих каскадов.

Конденсаторы C_1 и C_2 разряжаются соответственно по цепям $R_{н1}$, TT_1, $Д_5$; $R_{н2}$, TT_2, $Д_6$.

Через промежуток времени t, необходимый для запирания всех тиристоров, на вход *Вх. 2* подается импульс положительной полярности. Этот импульс открывает тиристор $3T$. Конденсаторы C_1 и C_2 при этом заряжаются и, так как сопротивления резисторов $R_2 \ll R_6$ и $R_3 \ll R_7$, ток заряда конденсаторов C_1 и C_2 открывает тиристоры TT_2 и TT_3. Таким образом, каждая пара входных импульсов закрывает открытый тиристор и открывает следующий за ним закрытый, т. е. продвигает записанную информацию на один разряд.

Рассмотрим основные соотношения, необходимые для расчета кольцевого счетчика.

Сопротивления резисторов R_2—R_5 и емкости конденсаторов C_1—C_4 выбираются из условий

$$R_2 \leqslant \frac{E - U_{спр.тт} U_{ост.зт}}{3 I_{спр.тт}};$$

$$C_1 \geqslant \frac{\tau_у}{R_2},$$

где $\tau_у$ — длительность управляющего импульса при заданных значениях $U_{спр.тт}$ и $I_{спр.тт}$.

Минимальный период следования управляющих импульсов определяется выражением

$$T_{мин} = t + t_{вкл.зт} + 5\tau_у,$$

где t — время, необходимое для запирания всех тиристоров счетчика.

Выходные импульсы, снимаемые с сопротивлений нагрузок, имеют форму, близкую к прямоугольной, при этом нарастание и спад импульсов определяются соответственно временем включения $t_{вкл}$ тиристоров счетчика и постоянной времени разряда конденсаторов C_1—C_4.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Электрические параметры тиристоров 2У102А—2У102Г *

Тип тиристора	Наибольшее анодное (прямое) напряжение, В
2У102А	50
2У102Б	100
2У102В	150
2У102Г	200

* Для всех тиристоров этого типа.

Обратное напряжение, В, не более	5
Ток выключения[1], мА, не более	20
Импульсный ток запирания[2], мА, не более	20
Импульсный ток спрямления[3], мА, не более	20
Импульсное напряжение запирания[2], В, не более	12
Импульсное напряжение спрямления[4], В, не более	7
Остаточное напряжение, В, не более	2,5
Запираемый анодный ток[5], мА, не более	50
Рассеиваемая мощность, Вт, не более	0,16
Время включения, мкс, не более	5
Время запирания, мкс, не более	20
Скорость нарастания анодного напряжения, В/мкс, не более . .	200
Долговечность, ч, не менее	10 000

[1] При температуре окружающей среды —60±2°С и анодном напряжении 20 В.

[2] При температуре окружающей среды 20±5 и 70±2°С, наибольшем анодном напряжении, длительности запирающего импульса 20 мкс, анодном токе 50 мА и частоте не более 1 кГц.

[3] При температуре окружающей среды 20±5 и —60±2°С, анодном напряжении 10 В, анодном токе 30 мА, длительности запускающего импульса 5 мкс и частоте не более 1 кГц.

[4] При температуре окружающей среды —70±2°С, отключенном аноде, импульсном токе спрямления не более 20 мА, длительности запускающего импульса 5 мкс и частоте не более 1 кГц.

При температуре окружающей среды от —60 до +70 С.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Электрические параметры тиристоров КУ204А—КУ204В *

Тип тиристора	Наибольшее анодное напряжение, В	Импульсный ток запирания, мА
КУ204А	50	400[1]
КУ204Б	100	400[2]
КУ204В	200	400[3]

* Для всех тиристоров этого типа.

Импульсный ток спрямления[1] не более, мА 150
Импульсное напряжение спрямления[2] не более, В 5
Импульсное напряжение запирания[3] не более, В 3
Остаточное напряжение не более, В 3,2
Запираемый анодный ток[4] не более, А 2
Анодный ток открытого прибора при температуре окружающей среды —25°С не более, А 1
Длительность запирающего импульса не более, мкс 120
Наибольший импульсный прямой ток в цепи управляющего электрода, мА:
при длительности запускающего импульса не менее 10 мкс 600
при длительности запускающего импульса не более 10 мкс 450
Наибольшая мгновенная мощность запускающего импульса, Вт:
при длительности импульса не менее 10 мкс 1,7
при длительности импульса не более 10 мкс 0,9
Скорость нарастания прямого напряжения, В/мкс 20
Долговечность не менее, ч 8000

[1] При запираемом анодном токе 1 А и прямом напряжении 20 В.
[2] При токе в цепи управляющего электрода 150 мА.
[3] При токе в цепи управляющего электрода 400 мА.
[4] При температуре корпуса 55°С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ауэн Л. Ф.** Бесконтактные переключатели и пересчетные схемы на тиристорах. М,. «Энергия», 1968. 89 с. с ил

2. **Импульсные** схемы на динисторах и тиристорах. М., «Наука», 1968. 239 с. с ил. Авт.: Р. В. Билик, В. С. Крутенко, В. Г. Машлыкин и др.

3. **Бруннето Ф.** Новый полупроводниковый переключатель. — «Электроника», 1963, № 17, с. 60.

4. **Горохов В. А., Щедрин М. Б.** Тиристоры в импульсных схемах. М., «Советское радио», 1972. 303 с. с ил.

5. **Горохов В. А., Колосов И. Н., Щедрин М. Б.** Эффективный способ построения импульсных схем с использованием запираемых тиристоров. — «Сб. статей МЛТИ», 1967, вып. 16, с. 271—286.

6. **Горохов В. А., Кругликов П. Ф.** Магнитно-полупроводниковые логические элементы. — «Автоматика и вычислительная техника», 1969, № 6, с. 62.

7. **Грефхем.** Запираемый переключатель повышает скорость коммутации постоянного тока. — «Электроника», 1964, т. 37, № 12, с. 29—38.

8. **Скаржепа В. А., Морозов А. А.** Исследование динамических характеристик ключа с катодной нагрузкой на запираемом тиристоре. — «Изв. вузов. Радиоэлектроника», 1972, т. 15, № 5, с. 576—580.

9. **Дзюбин И. И.** Тиристоры в электрических схемах. М., «Энергия», 1972. 111 с. с ил.

10. **Каганов И. Л., Малахов Э. С.** Типовые элементы релейного и коммутационного действия с двухоперационными тиристорами. — «Электричество», 1966, № 1, с. 28—33.

11. **Коссов О. А., Хасаев О. И.** Полностью управляемые тиристоры в устройствах автоматики. М., «Энергия», 1970. 113 с. с ил.

12. **Горохов В. А., Кругликов А. Ф.** Анализ схем запуска и запирания триодных тиристоров. — «Сб. статей МЛТИ», 1967, вып. 16, с. 167—187.

13. **Скаржепа В. А., Морозов А. А.** Исследование характеристик тиристорного ключа на запираемых тиристорах с катодной нагрузкой. — «Изв. вузов. Радиоэлектроника», 1971, т. 14, № 3, с. 280—286.

14. **Скаржепа В. А., Морозова А А.** Построение и расчет ключевых схем на запираемых тиристорах с катодной нагрузкой. — «Изв. вузов. Радиоэлектроника», 1974, т. 17, № 1, с. 56—60.

15. **Соломин В. И.** Применение тиристоров в феррит-диодных схемах. «Приборы и системы управления», 1971, № 6, с. 44—45.

16. **Тиристоры.** Технический справочник. Под ред. В. А. Лабунцова, С. Г. Обухова, А. Ф. Свиридова, М., «Энергия», 1971. 560 с. ил.

17. **Горохов В. А., Кошеляев Г. В.** Неоднородные явления при выключении тиристора по управляющему электроду. — «Радиотехника», 1971, т. 26, № 12, с. 86—90.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Иван Иванович Дзюбин

ЗАПИРАЕМЫЕ ТИРИСТОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

●

Редактор Б. Н. Иванчук
Редактор издательства А. Г. Козлова
Обложка художника А. А. Иванова
Технический редактор Т. А. Маслова
Корректор А. Д. Халанская

●

Сдано в набор 17/III 1976 г.
Подписано к печати 3/VIII 1976 г.
Т-15112 Формат $84 \times 108^1/_{32}$ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 2,1 Уч.-изд. л. 2,45
Тираж 30 000 экз. Зак. 583 Цена 11 коп.

Издательство «Энергия»,
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

НАШИМ ЧИТАТЕЛЯМ

Издательство «Энергия» и редакция МРБ книг не высылают. Литературу по вопросам радиоэлектроники и радиолюбительства можно приобрести в магазинах научно-технической книги или в универсальных магазинах, где есть отдел научно-технической книги.

Публикации о книгах, которые будут издаваться в текущем году, ежегодно печатаются в первых номерах журнала «Радио».

Заказывать книги МРБ рекомендуем только по плану текущего года и даже квартала, так как они расходятся очень быстро.

Радиолюбители, живущие в местах, где нет книжных магазинов, могут обратиться в республиканские магазины научно-технической книги своей республики по следующим адресам:

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ ССР — г. Баку, уль Саратовца-Ефимова, 30.
АРМЯНСКАЯ ССР — г. Ереван, ул. Абовяна, 17, магазин № 1.
БЕЛОРУССКАЯ ССР — г. Минск, 5, Ленинский проспект, 48.
ГРУЗИНСКАЯ ССР — г. Тбилиси, проспект Руставели, 37.
КАЗАХСКАЯ ССР — г. Алма-Ата, ул. Чайковского, 120.
КИРГИЗСКАЯ ССР — г. Фрунзе, Советская ул., 206, магазин № 1.
ЛАТВИЙСКАЯ ССР — г. Рига, ул. Ленина, 29.
ЛИТОВСКАЯ ССР — г. Вильнюс, проспект Ленина, 29.
МОЛДАВСКАЯ ССР — г. Кишинев, ул. Пушкина, 15.
ТАДЖИКСКАЯ ССР — г. Душанбе, проспект Ленина, 128.
ТУРКМЕНСКАЯ ССР — г. Ашхабад, Хивинская ул., 1.
УЗБЕКСКАЯ ССР — г. Ташкент, 122, Волгоградская ул., 10-а.
УКРАИНСКАЯ ССР — г. Киев, 30, ул. Ленина, 10, магазин № 1; г. Львов, Базарная ул., 10; г. Харьков, 12, ул. Свердлова, 17.
ЭСТОНСКАЯ ССР — г. Таллин, проспект Ленина 7.

Адрес редакции Массовой радиобиблиотеки: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, издательство «Энергия».

Цена 11 коп.